

四面鍛造デバイスによる軸材の鍛造工程効率化

Improving the Efficiency of the Round Bar Forging Process
by Four Die Forging Device (FDFD)

外処 将貴*
Masaki Todokoro



青山 明祐*
Akihiro Aoyama



田中 慎二*
Shinji Tanaka



熊谷 保之*
Yasuyuki Kumagai



Dr. Viktor Lazorkin**



Dmitriy Lazorkin**

要 旨

Lazorkin Engineering 社で開発された四面鍛造デバイス (= Four Die Forging Device : FDFD) の導入により、既存のプレスにおいて上下左右 4 方向からの同時圧下による四面鍛造が簡易に行えるようになった。本導入により横膨らみを抑制しながら効率よく鍛造することが可能となり、特に円断面形状製品のプレス時間の短縮が期待できる。

プレス時間短縮のためには、寸法収束性の高い FDFD を鍛伸初期から使用することが効果的である。これを実現するためには、FDFD の使用のみで鋼塊内部の空隙欠陥 (以下、ザクと呼ぶ) を圧着する必要がある。そこで最少鍛造比でザク圧着が完了した実績をもとに、ザク圧着に必要な最低限のザク圧着指標を FEM 弾塑性解析により導出した。その指標をもとに FDFD による鍛伸のみでザク圧着完了の可否を検証した。さらに、通常の仕上げ丸め作業に必須である均し工程を省略した四面鍛造を適用することにより、更なるプレス時間の短縮を試みた。ザク圧着工程から仕上げ工程までを FDFD のみで鍛造した結果、内部品質を損なうことなく鍛造時間が従来品と比較して約 41% 短縮された。

— Synopsis —

Japan Steel Works M&E Inc. had installed Four Die Forging Device (FDFD) designed by Lazorkin-Engineering, LLC in the forging shop. The FDFD enables to perform four-side radial forging in an existing conventional open-die hydraulic forging press. The FDFD can forge bar shape materials efficiently with suppressing lateral expanding. Especially, it is expected that the forging time of round cross-section products can be shortened.

In order to further shortening the forging time, it is effective to use the FDFD which can make high precision forging, from the beginning of the process. For realization of the shortening forging time, closing shrinkage cavity in ingots using the FDFD is required without other void closure processes. Therefore, we derived void closure threshold in the FDFD by FEM elasto-plastic analysis and our experiences of void closure in minimum forging ratio. Then we verified the possibility of void closure using the FDFD alone based on the threshold. Furthermore, we tried to shorten the forging time by applying FDFD without the leveling process, which is essential for normal finish rounding work. As a result of performing the void closure process to the finishing process with the FDFD alone, the forging time was decreased by approximately 41% compared to conventional methods without deteriorating its internal quality.

*: 日本製鋼所 M&E (株) 室蘭製作所 鑄鍛鋼ユニット
Forgings & Castings Unit, Muroran Plant, Japan Steel Works M&E Inc.

** : Lazorkin Engineering, LLC

1. 緒言

単純丸棒・段付き丸棒など量産型円断面形状軸材においては、コスト低減の要求が強い。しかし、我々は鍛造工程において長らく有効なコスト低減(CR)策を講じることができていなかった。この課題を解決するために、Lazorkin Engineering社(以下、LE社と呼ぶ)から四面鍛造デバイス(= Four Die Forging Device : FDFD)を導入した(図1)。FDFDの導入により、上下方向の加圧力を機械的に上下左右4方向へ分散可能となり、横膨らみの少ない高効率四面鍛造が簡易的に行えるようになった(図2)。FDFDは鍛伸・仕上げ丸め工程のプレス時間短縮に有効であることは明らかとなっている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾が、鋼塊内部の空隙欠陥(以下、ザクと呼ぶ)の圧着能力については現状で未解明な点が多く、FDFDのザク圧着効果を評価した事例はほとんどない。そこで我々はFEM弾塑性解析によりFDFDのザク圧着効果の定量評価を行い、FDFDのみを使用したザク圧着を検証した。本報告では、ザク圧着から仕上がりまでFDFDのみで完結することで円断面形状製品の鍛造時間を大幅に改善した事例について述べる。



図1 FDFDの外観

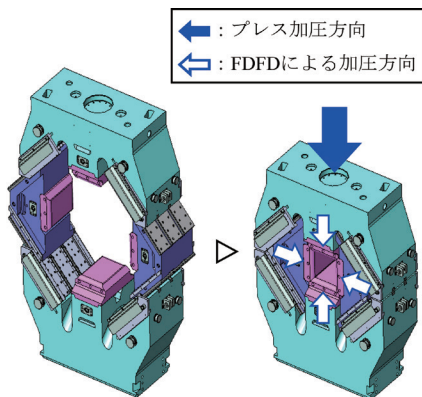


図2 FDFDによる四面鍛造のイメージ

2. FDFDを用いたザク圧着方法の確立

2.1 現状のザク圧着方法

鋼塊内部に不可避に存在するザクは未圧着の場合 UT欠陥として検出されるため、製品仕上げ工程までに圧着する必要がある。ザクを圧着するための現在の鍛造方法としては、上下平金敷または上下V形状金敷を用いて2.5S程度の強圧下を行う工程を採用している(図3)。一方で強圧下を行うと材料の横膨らみ(図4)が大きくなり、寸法収束性の悪化が課題となる。ザク圧着工程を省略または簡略化することができれば、寸法収束効率の良い鍛伸工程の採用が可能となり、プレス時間の短縮が期待できる。

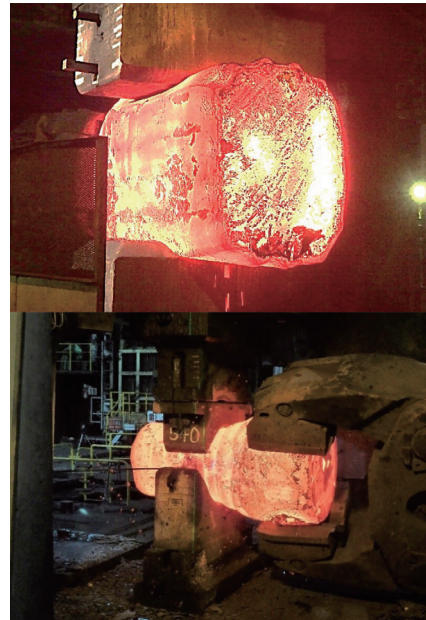


図3 上下平金敷を用いたザク圧着工程(上)と上下V形状金敷を用いたザク圧着工程(下)

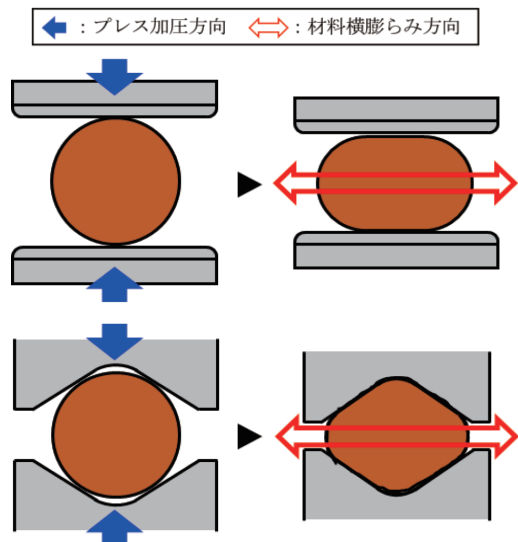


図4 上下平金敷(上)と上下V形状金敷(下)によるザク圧着工程の横膨らみ

2.2 ザク圧着最少鍛造比の検討

FDFD によるザク圧着をより簡易かつ確実にを行うために、ザク圧着に必要な最低限の鍛造比を検証する実機試験を行った。図5に試験の概要を、図6に試験中～冷材までの写真を示す。供試材は本体重量約27t(2.5CrMoV鋼)の鋼塊3本である。鋼塊形状は3本全てT側径φ1495mm×2360mmLである。鋼塊は1270℃まで昇温後、3000tプレスにて450mm中の上下平金敷を用いて金敷掛け巾90%、圧下量90～100mmで□1040mm(条件①)、□960mm(条件②)、□890mm(条件③)へと鍛伸した。凝固解析によるザク予測の結果、本供試材の最大ザクサイズ位置における鋼塊径はφ1364mmであり、φ1364mmから算出した鍛造比はそれぞれ条件①:1.42S、条件②:1.66S、条件③:1.92Sであった。鍛造終了後は焼鈍(AN)して冷材化した後、グラインダーにて表層を長手方向に巾400mm計4条研磨し、超音波探傷試験(以下、UTと称する)で図5のハッチングエリア直下の内部欠陥を4方位から評価した。図7にUTの結果を示す。条件①、②ではUT欠陥が検出されたが、条件③□890mm(1.92S)では検出されず、軸芯のMDFS(= Minimum Detectable Flaw Size, 最小検出欠陥サイズ)は約φ2.5mmであった。検出された欠陥が未圧着のザクであるか確かめるために、条件①、②において鋼塊復元を実施した。図8、図9に条件①、②における鋼塊復元結果を示す。条件①、②において検出されたUT欠陥の領域は、凝固解析から予測されたザク域(φ3.0mm以上)と一致した。したがって、条件①、②にて検出された欠陥は未圧着のザクと考えられ、ザク圧着工程を省略した真鍛造比1.92Sという低鍛造比かつ強圧下しない条件でザクが圧着することがわかった。

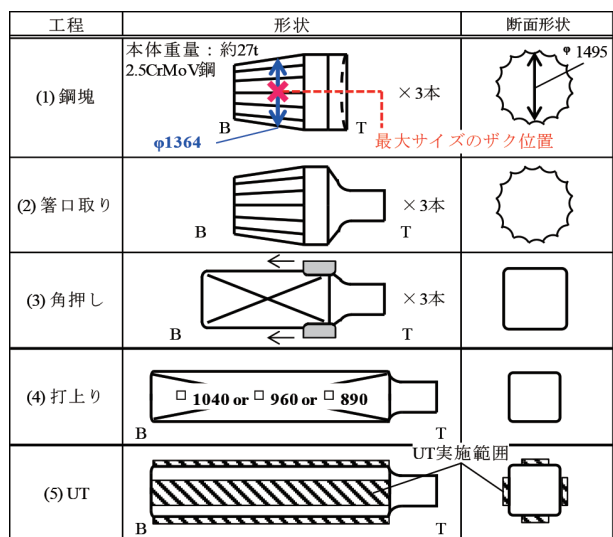


図5 ザク圧着検証試験概要

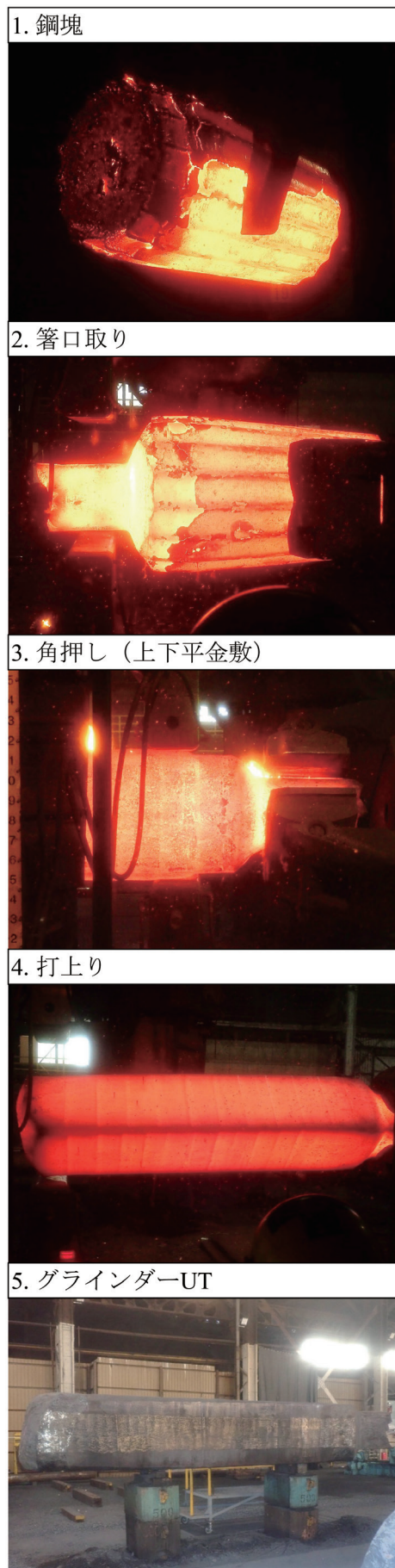


図6 ザク圧着検証試験写真

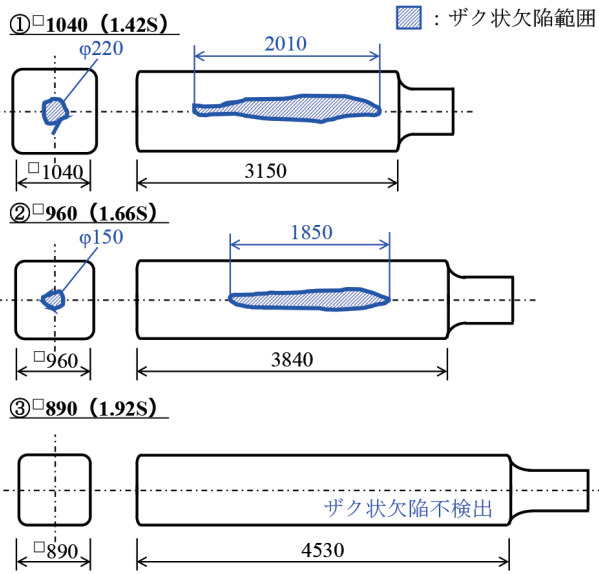
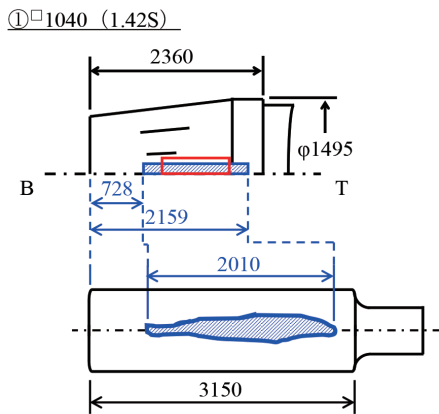
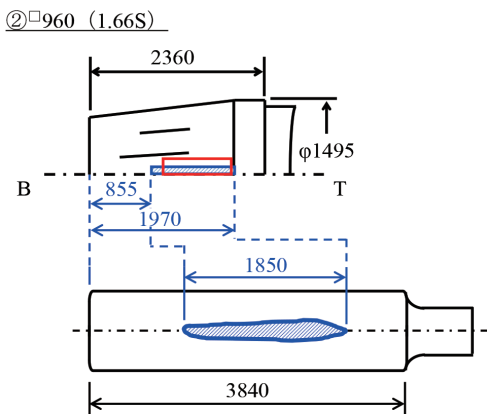


図7 ギャク圧着検証試験 UT 結果



□ 凝固解析によるギャク予測域 ($\phi 3.0$ 以上)
 ■ ギャク状欠陥範囲

図8 鋼塊復元結果 (条件①)



□ 凝固解析によるギャク予測域 ($\phi 3.0$ 以上)
 ■ ギャク状欠陥範囲

図9 鋼塊復元結果 (条件②)

2.3 ギャク圧着指標の定量評価

真鍛造比 1.92S でギャク圧着が完了した条件③における軸芯のギャク圧着指標を Abaqus6.14-1 を使用した FEM 解析により導出した。表 1 に解析条件を、表 2 に圧下パススケジュールを示す。図 10 に FEM 解析初期モデルを示す。解析初期モデルは条件③の最大ギャクサイズ位置における鋼塊径の円柱形状とした。解析モデル形状簡略化のため、対称性を考慮して 1/8 領域をモデル化した。当社がギャク圧着の指標として用いている静水圧応力比積分 G_m ・空隙体積減少率 R_v の 2 指標で、金敷中央部直下の軸芯部にてギャク圧着効果を評価した。静水圧応力比積分 G_m ・空隙体積減少率 R_v は以下の式(1)、式(2)で定義されている⁽⁵⁾。ここで ϵ_f は空隙位置での鍛造終了時の相当ひずみ、 p は静水圧応力、 ϵ_{eq} は相当塑性ひずみ、 σ_{eq} は相当応力、 C_{ij} は n 次の同時多節式の係数 ($C_{00}, C_{10}, C_{11}, \dots, C_{0n}, C_{n0}$) である。式(3)における分散の値が大きな説明変数を抽出することで求められた重回帰式の係数を表 3 に示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$G_m = \int_0^{\epsilon_f} \left(-\frac{p}{\sigma_{eq}} \right) d\epsilon_{eq}$$

$$\equiv \sum_{i=1}^n \left(-\frac{p}{\sigma_{eq}} \right)^i \Delta\epsilon_{eq}^i \quad (1)$$

$$R_v = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-j} C_{ij} \epsilon_{eq}^i G_m^j \quad (2)$$

材料物性は類似材質である 3.5NiCrMoV 鋼のものを用いた。モデルの初期温度は 1270℃ 均一とし、各圧下パス終了形状で逐次熱伝導解析を行うことにより実機と同様な温度分布を再現した。図 11 に条件③のギャク圧着指標の出力結果を示す。各パスにおける各々のギャク圧着指標を累積した結果、27t 鋼塊におけるギャク圧着の閾値(以降、閾値 A とする)は以下であることがわかった。

$$\text{静水圧応力比積分 } G_m \geq 0.708$$

$$\text{空隙体積減少率 } R_v \geq 0.589$$

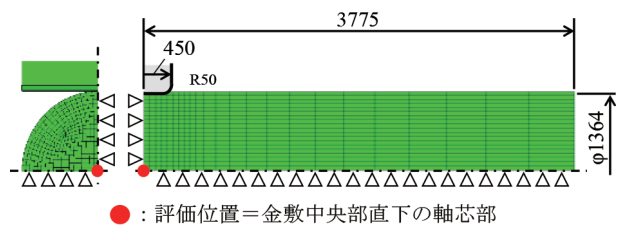


図10 FEM 解析初期モデル

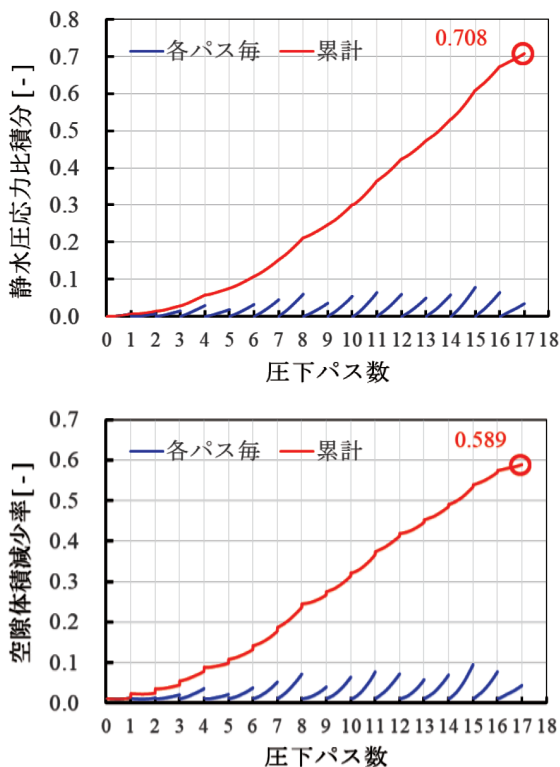


図11 条件③のザク圧着指標出力結果

表1 FEM解析条件

項目	条件
使用コード	Abaqus6.14-1
使用要素	八節点六面体一次要素 (C3D8)
材質	3.5NiCrMoV
初期形状 [mm]	φ1364
初期温度 [°C]	1270
圧下速度 [mm/s]	50
金敷巾 [mm]	450
金敷面取り [mm]	C50
金敷掛け巾 [%]	90

表2 FEM解析における圧下パススケジュール

パス	方位	空放時間 [min]	圧下前寸法 [mm]	圧下後寸法 [mm]	圧下量 [mm]
1	A	15.5	1364.0	1290.0	74.0
2	B	16.5	1391.1	1295.0	96.1
3	A	17.5	1298.1	1235.0	63.1
4	A	18.0	1235.0	1155.0	80.0
5	B	19.0	1329.1	1240.0	89.1
6	B	20.0	1240.0	1150.0	90.0
7	A	21.0	1205.7	1100.0	105.7
8	A	22.0	1100.0	1005.0	95.0
9	B	23.0	1235.2	1125.0	110.2
10	B	24.0	1125.0	1020.0	105.0
11	A	25.0	1090.9	980.0	110.9
12	A	26.5	980.0	905.0	75.0
13	B	28.5	1114.6	1005.0	109.6
14	B	29.5	1005.0	920.0	85.0
15	A	31.0	993.7	890.0	103.7
16	B	32.5	976.3	890.0	86.3
17	A	34.0	934.2	890.0	44.2

※圧下方位：A=0°-180°，B=90°-270°

表3 式(2)の係数

i \ j	0	1	2	3
0	0.011	1.488	-0.480	-
1	-0.291	-0.911	0.295	
2	1.164	-		
3	-0.382			

2.4 FDFD を用いたザク圧着効果の検証

以上の結果をもとに、FDFDによる鍛伸のみでのザク圧着可否を検証した。銅塊からFDFDのみで丸棒を鍛造する荒押し工程を模擬したFEM解析を行いザク圧着効果を評価した。解析初期モデルは、模擬する銅塊の最大ザクサイズ位置における銅塊径(φ868mm)の円柱形状とした。φ868mmからFDFDの使用のみで金敷掛け巾50%にて鍛伸した際に、閾値Aと同等以上のザク圧着指標となる鍛造比を検証した。表4に解析条件を、表5に圧下パススケジュールを示す。FEM弾塑性解析の手法は2.3節に示した通りである。図12に解析出力結果(対閾値A)を示す。圧下パススケジュール毎に静水圧応力比積分 G_m 、空隙体積減少率 R_v を累積した結果、

表4 FEM解析条件

項目	条件
使用コード	Abaqus6.14-1
使用要素	八節点六面体一次要素 (C3D8)
材質	3.5NiCrMoV
初期形状 [mm]	φ868
初期温度 [°C]	1200
圧下速度 [mm/s]	50
金敷巾 [mm]	600
金敷面取り [mm]	R50
金敷掛け巾 [%]	50

表5 圧下パススケジュール

パス	方位	空放時間 [min]	圧下前寸法 [mm]	圧下後寸法 [mm]	圧下量 [mm]
1	A	5.0	868.0	850.0	18.0
2	B	6.0	868.8	850.0	18.8
3	A	7.0	850.9	800.0	50.9
4	B	8.0	854.7	800.0	54.7
5	A	9.0	804.6	750.0	54.6
6	B	10.0	804.8	750.0	54.8
7	A	11.0	753.9	700.0	53.9
8	B	12.0	754.7	700.0	54.7
9	A	13.0	704.5	650.0	54.5
10	B	14.0	705.2	650.0	55.2
11	A	15.0	654.9	600.0	54.9
12	B	16.0	655.7	600.0	55.7
13	A	17.0	605.3	550.0	55.3
14	B	18.0	606.0	550.0	56.0
15	A	19.0	555.1	500.0	55.1
16	B	20.0	556.1	500.0	56.1
17	A	21.0	504.6	450.0	54.6
18	B	22.0	505.9	450.0	55.9
19	A	23.0	454.7	400.0	54.7
20	B	24.0	455.6	400.0	55.6

※圧下方位：A=0°-90°-180°-270°，B=45°-135°-225°-315°

対辺寸法が 500 mm となる八角形状になった時点(真鍛造比 2.86S)で軸芯のザク圧着指標は閾値 A 以上となった。

FDFD により閾値 A 以上のザク圧着効果を鋼塊に付与することで、実際にザクが圧着するかを実機鍛造により検証した。供試材は本体重量約 10t(1.8NiCrMoV 鋼)の鋼塊(T 側径 ϕ 955 mm \times 2040 mmL) 1 本である。鋼塊は 1200℃ まで昇温後、小型プレスにて金敷巾 600 mm の FDFD を使用して金敷掛け巾 50%、圧下量 50 ~ 90 mm で対辺寸法が 500 mm なる八角となるまで鍛伸した。図 13 に FDFD によるザク圧着鍛伸試験概要を、図 14 に試験中の写真を示す。2.1 節と同様に焼鈍(AN)後に図 13 のハッチング部の UT を実施した。UT 結果は、No-ind. であり軸芯の MDFS は ϕ 1.6 mm であった。よって、FDFD による鍛伸のみでザク圧着が可能であることがわかった。

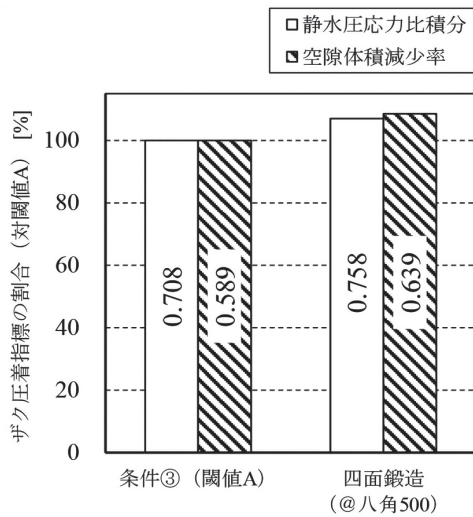


図 12 四面鍛造のザク圧着指標出力結果 (対閾値 A)

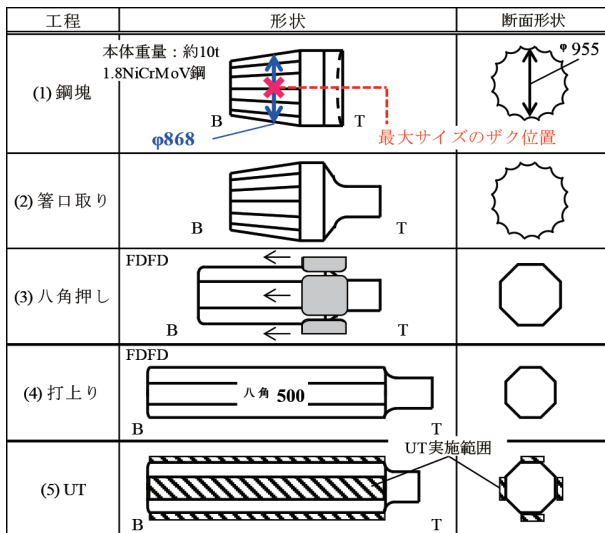


図 13 FDFD ザク圧着鍛伸試験概要

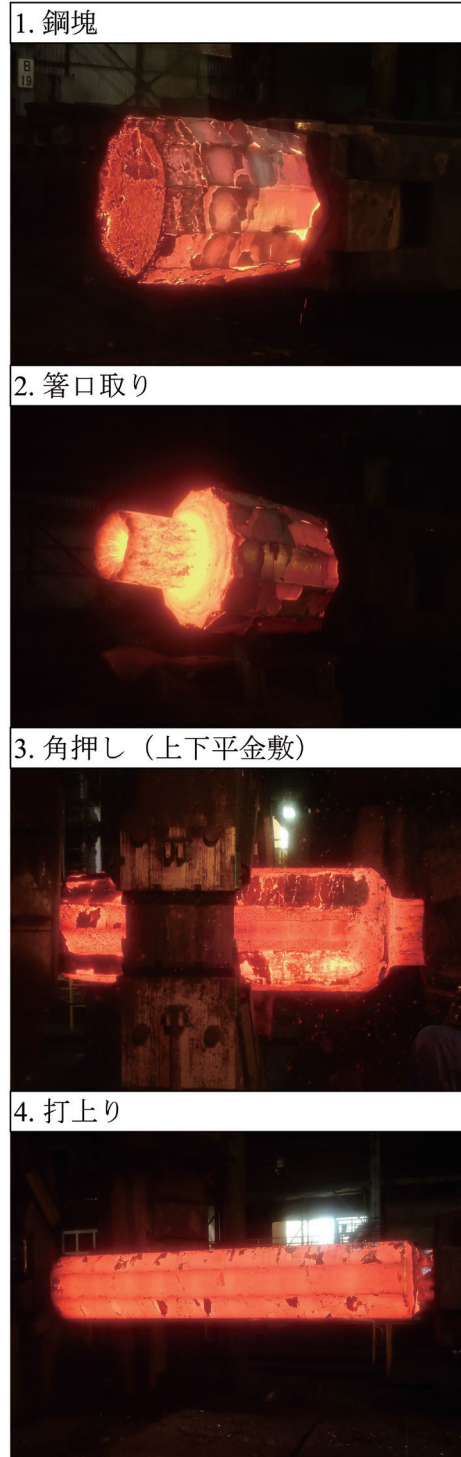


図 14 FDFD ザク圧着鍛伸試験写真

3. FDFD による仕上げ丸め作業の高効率化

3.1 現状の丸棒の鍛造要領

図 15 に現在の鍛造丸棒の鍛造工程を、図 16 に打上げ径 $\phi 650$ の丸棒における鍛造工程(加熱工程含む)のコスト内訳を、図 17 に上下 R 形状金敷を用いて仕上げを行った丸棒の外観を示す。鍛造丸棒は 1 ヒート仕上り品が多く、鍛造工程の CR のためにはプレス時間短縮が必要となる。丸棒のザク圧着工程としては上下 V 形状金敷を用いた 2.5 S 程度の強圧下を行っている。強圧下することで材料の横膨らみが大きくなり、寸法収束性は悪化する。さらに鍛造丸棒の仕上げ工程では、マニピュレータにて材料を回転させつつ上下 R 形状金敷を用いて材料を引き鍛造する均し丸め(図 18)を数回に渡って実施している。そして横膨らみによって生じた材料表面の凹凸を均し、打上寸法を指定の公差内に収めている。この引き鍛造は材料の寸法が収束するまで 2~4 回実施されており、10~30 min の時間を要している。ザク圧着工程から仕上り工程までを FDFD で代替できれば常に横膨らみを矯正しつつ鍛伸効率のよい四面鍛造を行うことができるため、プレス時間の短縮が期待できる。

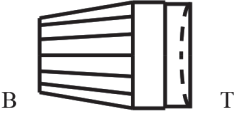


工程	形状
(1) 鋼塊	
(2) ザク圧着	上下V形状金敷による強圧下 
(3) 仕上り	上下R形状金敷による均し丸め 

図 15 現在の鍛造丸棒の鍛造工程

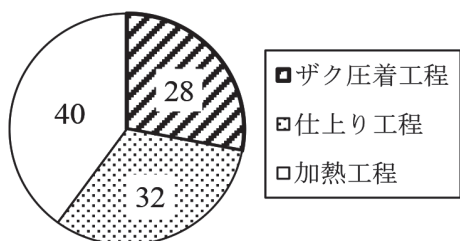


図 16 $\phi 650$ 丸棒の鍛造工程におけるコスト内訳



図 17 上下 R 形状金敷により仕上げを行った丸棒の外観

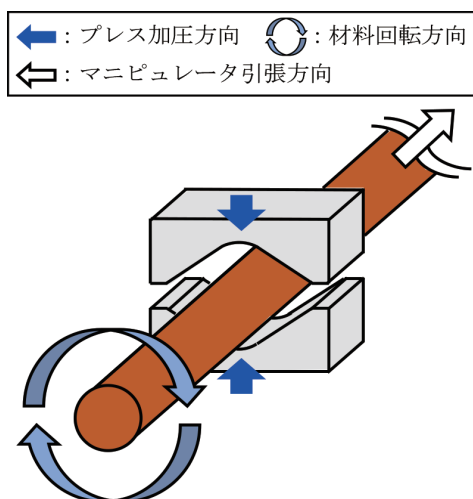


図 18 均し丸めのイメージ

3.2 丸棒における FDFD の打上精度確認

丸棒は打上公差が $-0 \sim +15$ mm 程度で寸法要求の厳しい製品が多く、寸法逸脱のリスクが高い。そこで、打上げ径 $\phi 650^{+15}_{0}$ mm \times 3200 mmL の素材で FDFD の打上精度を確認した。図 19 に試験鍛造工程を示す。供試材は鋼塊 T 側の直径が $\phi 955$ mm の鋼塊を模擬して、同直径の円柱形状とした。3S の鍛造比確保のため $\phi 1130$ mm まで据込み実施後、打上径 +100 mm までザク圧着工程を模擬した上下 V 形状金敷による強圧下を実施した。その後 FDFD にて寸法公差内に収まるまで一金敷ずつ丸めて仕上げることで FDFD の寸法収束性を確認した。図 20 に試験鍛造後の赤材写真(打上径 $\phi 650^{+15}_{0}$ mm)を示す。冷材化後スケールオフを行い、パス測定で寸法を評価した。冷材寸法は $\phi 655 \sim 660$ mm であり、寸法公差内に収束していることが確認できた。FDFD による仕上げ丸めを実施すれば、均しのための引き鍛造は省略可能であることがわかった。

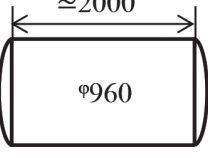
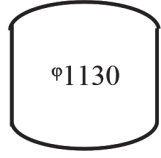

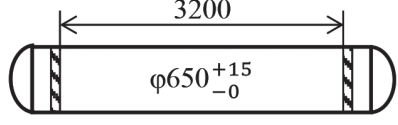
工程	形状
(1) 供試材	3.8NiCrMoV鋼 
(2) 据込み	
(3) ザク圧着 模擬	上下V形状金敷による強圧下 
(4) 仕上り	FDFD 

図19 打上精度確認試験工程



図20 仕上り後の試験材 (打上径 $\phi 650_{-0}^{+15}$)

3.3 FDFDのプレス時間短縮効果

3.2節の丸棒を模擬したFDFD試験鍛造結果から、FDFDのプレス時間短縮効果を調べた。従来品の調査対象は同形状の丸棒計8本であり、仕上げ工程では上下R形状金敷を用いて丸めを実施している。 $\phi 650_{-0}^{+15}$ mm × 3200 mmLの鍛造丸棒について従来品平均とFDFD試験鍛造品のプレス時間を比較した結果を図21に示す。仕上げ工程にFDFDを導入した際のプレス時間は従来品平均に対して約17%低減することができた。

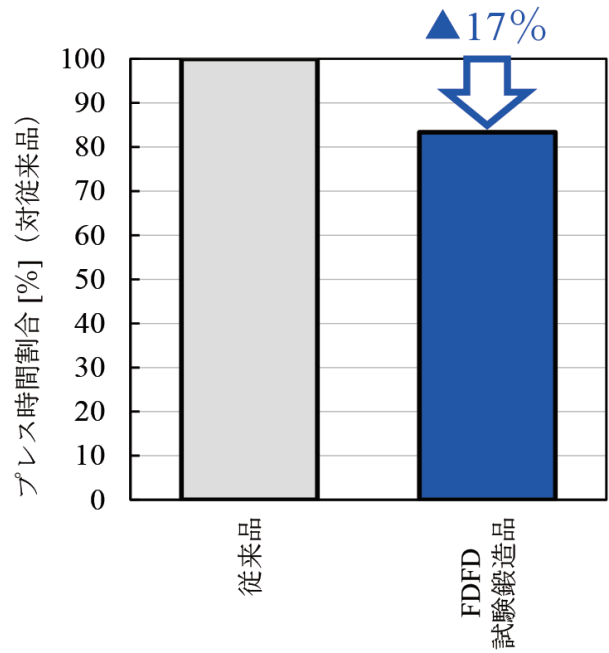


図21 仕上げ工程 FDFD 導入による
プレス時間短縮効果 ($\phi 650_{-0}^{+15}$ × 3200L 模擬)

4. FDFDのみによる実機鍛造

4.1 全鍛造工程へのFDFD適用

ザク圧着工程から仕上げ丸め工程までFDFDを使用する方法で実機適用した。適用品は、本体重量約7.4t (SCM432鋼)の鋼塊(T側径 $\phi 955$ mm × 1675 mmL)から鍛造される丸棒 $\phi 450_{-0}^{+15}$ mm × 5500 mmLである。鋼塊は1250℃まで昇温後、小型プレスにて3Sの鍛造比確保のためにB側径が $\phi 810$ mmとなるまで据込みを行い、金敷巾600 mmのFDFDを使用して金敷掛け巾50%以上、圧下量50 mm以上で対辺寸法が480 mmとなる八角形状へ鍛伸した。その後、FDFDにて一金敷ずつ丸めを行い、 $\phi 450_{-0}^{+15}$ mm × 5500 mmLの丸棒へ仕上げた。図22に鍛造工程の写真を示す。図23に従来品平均に対するプレス時間短縮効果を示す。従来品の調査対象は、ザク圧着工程と上下R形状金敷による均し丸め工程を伴う同形状の丸棒計4本である。全工程をFDFDで鍛造した場合、従来品平均と比べて、外部品質・内部品質を維持したまま約41%プレス時間短縮を実現できた。

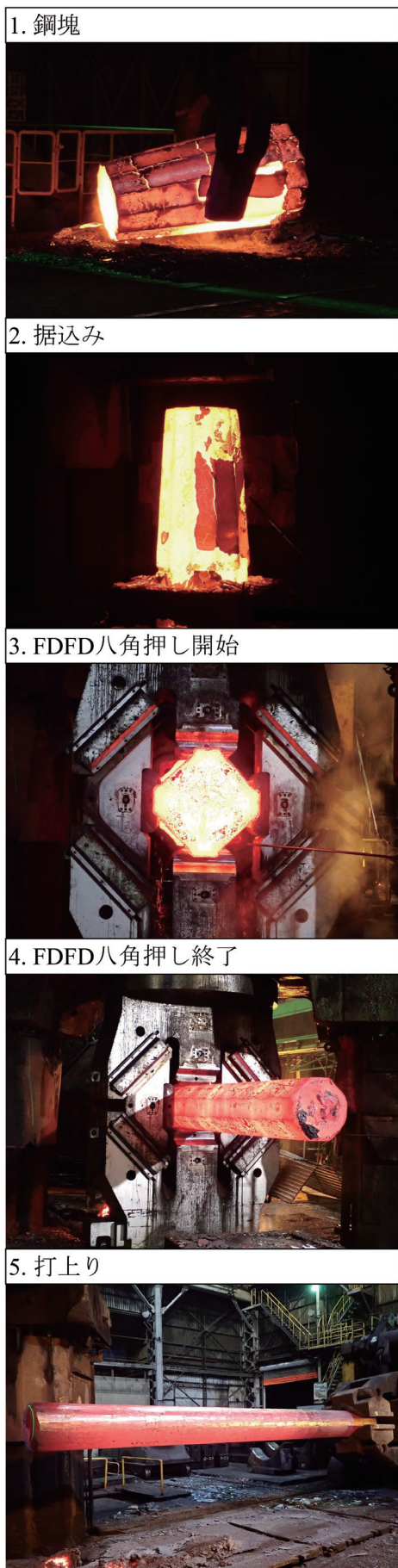


図 22 全工程 FDFD 使用時の丸棒鍛造工程写真

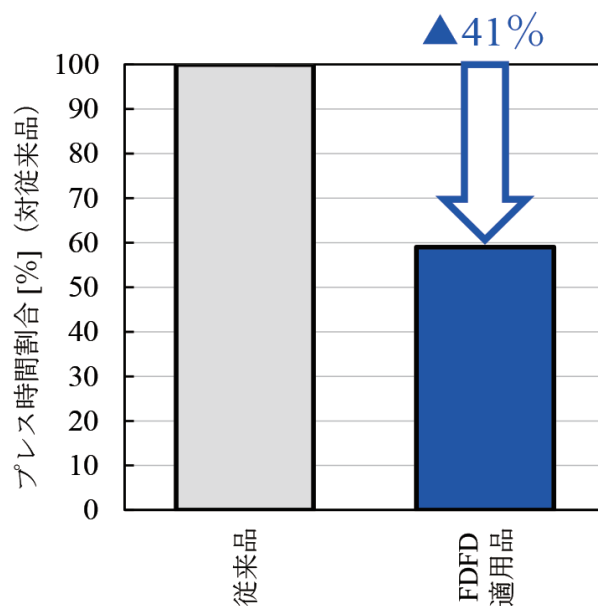


図 23 全工程 FDFD 導入による
プレス時間短縮効果 ($\phi 450_{0}^{+15} \times 5500L$ 模擬)

5. 結 言

実機鍛造と FEM 解析により最低限のザク圧着指標を導出することで、FDFD による鍛伸のみでザク圧着を実現した。ザク圧着から仕上げまで FDFD を使用することで、円断面形状製品のプレス時間の大幅な低減に成功した。本報告で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 最低限のザク圧着閾値を導出し以下の値を得た。

$$\text{静水圧応力比積分 } G_m \geq 0.708$$

$$\text{空隙体積減少率 } R_v \geq 0.589$$

(2) 上記閾値管理により FDFD による鍛伸のみでザク圧着を実現した。

(3) $\phi 650$ mm 丸棒の仕上げ工程に FDFD を適用した場合、約 17% のプレス時間短縮効果が得られた。

(4) $\phi 450$ mm 丸棒の全鍛造工程に FDFD を適用した場合、約 41% のプレス時間短縮効果が得られた。

参考文献

- (1) Viktor Lazorkin, Dmitriy Lazorkin, and Sergey Kuralekh: "New Design Solutions of Four-Die Forging Devices (FDFD) and Open-Die Forging Technologies", *Advances in Materials*, Vol. 7 (2018), pp.1 - 8
- (2) Viktor Lazorkin, Dmitriy Lazorkin, Roman Onischenko, and Sergey Kuralekh: "New Design Solutions of Four-Die Forging Devices (FDFDs) and Their Technological Capabilities", *FIA Magazine*, (2020), pp.110 - 116
- (3) Viktor Lazorkin and Dmitriy Lazorkin: "New Development of Four-Die Forging on Open-Die Forging Presses", 19th International Forgemasters Meeting, (2014), pp.210 - 214
- (4) Viktor Lazorkin and Yuriy Melnykov: "New Technologies of Forging of Ingots and Blanks by Four Dies in Open - Die Forging Presses", 18th International Forgemasters Meeting, (2011), pp.326 - 332
- (5) 田中 光之, 小野 信市, 常野 誠: "鍛造による空隙圧着を支配する因子", *Journal of the JSTP*, Vol. 27 (1986) No. 306, pp.852 - 859
- (6) 小野 信市, 南 克之, 落合 朋之, 岩館 忠雄, 中田 進一: "超大形軸材の鍛造における内部空けき圧着に関する研究 (第1報, 空けき閉鎖特性評価式の導出)", *日本機械学会論文集 (C編)*, 61巻 (1995) 585号, pp.387 - 392
- (7) 小野 信市, 南 克之, 岩澤 秀雄, 岩館 忠雄, 中田 進一: "超大形軸材の鍛造における内部空けき圧着に関する研究第2報, 押込形平金敷鍛伸法の有用性", *日本機械学会論文集 (C編)*, 61巻 (1995) 588号, pp.279 - 286
- (8) 岸本 敦, 有川 剛史, 香川 恭徳, 高原 浩司: "鋼塊を用いた空隙欠陥の閉鎖技術の開発 - 欠陥閉鎖パラメータ Q 値を用いた操業改善-", *Journal of the JSTP*, Vol. 60 (2019) No. 701, pp.167 - 174
- (9) 柿本 英樹, 有川 剛史, 岸本 敦: "内部欠陥閉鎖挙動の予測技術", *神戸製鋼技報*, Vol. 64 (2014) No. 2, pp.33 - 37
- (10) 毛利 健吾, 有馬 猛, 福谷 理明, 寺崎 俊夫: "多パス鍛造における空隙閉鎖評価因子の検討 - 大型鋼塊の空隙閉鎖に関する研究 第2報-", *Journal of the JSTP*, Vol. 57 (2016) No. 664 pp.462 - 467